УДК.621.165

Ефимов А.В., Адель Аль-Тувайни, Меньшикова Е.Д., Гаркуша Т.А.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ

Атомные и тепловые электростанции являются основой энергетики во многих странах мира и определяют, в этой связи, темпы их экономического развития. В то же время, именно они как сложные технологические системы представляют собой объекты повышенной техногенной опасности. Поэтому разработаны и продолжают разрабатываться способы повышения безопасности энергетического оборудования ТЭС и АЭС, которые, в значительной мере, опираются на диагностические процедуры.

Одним из таких способов является применение в составе АСУ ТП энергоблоков автоматизированных систем технической диагностики энергетического оборудования, основанных на математическом моделировании технологических процессов. Техническая (или, иначе, параметрическая) диагностика позволяет установить причины отклонений параметров оборудования от нормальных значений в результате появления изменений в его конструкции: различным значениям параметров соответствуют различные технические состояния. Достоверность результатов параметрической диагностики определяется вероятностью совпадений оцененного и истинного состояний.

Существуют различные методы автоматизированной параметрической диагностики энергетического оборудования, базирующиеся на математическом моделировании технологических процессов. Это вероятностные методы оценки состояния оборудования на основании сравнения расчетных и нормативных значений диагностических параметров [1], методы, основанные на теории нечеткой логики в рамках идеологии экспертных систем [2], методы, использующие линейные диагностические модели [3, 4], и другие.

Достоверность результатов диагностирования с помощью этих методов во многом зависит от уровня адекватности математических моделей диагностируемого оборудования протекающим в нем технологическим процессам. Это условие для энергетического оборудования часто не выполняется, особенно при длительном периоде эксплуатации, в связи с тем, что его технические характеристики, а, значит, и параметры технологических процессов, изменяются под воздействием внешних факторов и в результате износа или даже разрушения отдельных конструктивных элементов.

Изменения свойств оборудования приводят к изменению адекватности математических формул, составляющих содержание моделей процессов. Например, многие из формул в интегральных методиках теплогидравлических расчетов тепломассообменного оборудования [5, 6] получены экспериментальным путем и содержат числовые параметры, идентифицирующие модель и процесс по результатам экспериментов. Однако конструкции диагностируемых объектов и значения параметров технологических процессов в них могут, как было сказано выше, с течением времени отличаться от условий экспериментов, в которых были получены соответствующие расчетные формулы. Поэтому для повышения достоверности результатов параметрической диагностики необходимо проводить идентификацию математических моделей процессов до начала диагностирования, иными словами, корректировать их на основании анализа входных и выходных данных в дискретные моменты времени, предшествующие моменту проведения диагностики.

В общем виде математические модели технологических процессов в энергетическом оборудовании представляют собой систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$F(X, Y, \lambda, G) = 0, \quad (1)$$

где X — вектор входных данных модели; Y — вектор выходных данных модели; λ — вектор числовых параметров, полученных на основании натурных экспериментов и позволяющих идентифицировать модель процессу; G — вектор задан

ных конструктивных характеристик оборудования; F — символическая запись функциональных отношений между X, Y, λ и G.

Интегральные методики расчетов энергетического оборудования позволяют разрешить это векторное уравнение в виде:

$$Y = f(X, \lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n, G), \quad (2)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n$ — числовые параметры вектора λ.

Рассмотрим случай идентификации математической модели оборудования, когда частные производные вектор-функции f по переменным $\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n$ могут быть представлены в аналитическом виде. Пусть вектор Y есть вектор-столбец измеряемых выходных параметров технологического процесса $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_m)^T$. Тогда, используя архивные данные измерений параметров процесса за предшествующий период эксплуатации оборудования, можно рассчитать среднее значение вектора Y:

$$\overline{Y} = (y_1, y_2, \ldots, y_m)^T.$$

Подставляя эти значения в (2), получим m уравнений относительно числовых параметров $\lambda_j, j = 1, 2, \ldots, n$:

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = f_1(X, \lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n, G) \\ y_2 = f_2(X, \lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n, G) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y_m = f_m(X, \lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n, G) \end{array}\right\} \quad (3)$$

Если в (3) $m = n$, то в случае, когда число уравнений равно числу идентифицируемых параметров $\lambda_j, j = 1, 2, \ldots, n$, решение системы нелинейных уравнений может быть найдено стандартными методами вычислительной математики, например, модифицированным методом Ньютона [7, 8]:

$$\Lambda_{k+1} = \Lambda_k - W^{-1}(\Lambda_0) \cdot f(X, \Lambda_k, G), \quad (4)$$

где $\Lambda_k = (\lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \ldots \lambda_n^{(k)})^T$, $\Lambda_0 = (\lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}, \ldots \lambda_n^{(0)})^T = (\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n)^T$,
k - номер итерации, $W^{-1}(\Lambda_0)$ - матрица обратная к матрице Якоби $W(\Lambda_0)$:

$$W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial \lambda_n} \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Для случая $m < n$, когда число уравнений меньше числа идентифицируемых параметров $\lambda_i, i = \overline{1,n}$ разработан следующий подход. Вместо матрицы $W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0)$ рассматривается матрица, составленная из модулей $W_1(\Lambda_0) = |f'(\Lambda_0)|$.

$$W_1(\Lambda_0) = |f'(\Lambda_0)| = \begin{pmatrix} \left|\frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1}\right| & \left|\frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2}\right| & \cdots & \left|\frac{\partial f_1}{\partial \lambda_n}\right| \\ \left|\frac{\partial f_2}{\partial \lambda_1}\right| & \left|\frac{\partial f_2}{\partial \lambda_2}\right| & \cdots & \left|\frac{\partial f_2}{\partial \lambda_n}\right| \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \left|\frac{\partial f_m}{\partial \lambda_1}\right| & \left|\frac{\partial f_m}{\partial \lambda_2}\right| & \cdots & \left|\frac{\partial f_m}{\partial \lambda_n}\right| \end{pmatrix}. \qquad (6)$$

Затем, используя матрицу $W_1(\Lambda_0) = |f'(\Lambda_0)|$, формируется квадратная матрица Якоби $W_2(\breve{\Lambda}_0)$ размерности $m_1 \times m_1$, столбцы которой содержат максимальные значения модулей производных $\left|\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j}\right|$ $i = 1,2,\ldots,m;\ j = 1,2,\ldots,n$ с определителем не равным нулю. При этом $m_1 \le m$ и $\Lambda_0 = (\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{m_1})^T$ с соответствующим изменением нумерации параметров λ_j. Идентификация модели осуществляется по методу (6), с использованием матрицы Якоби $W_2(\breve{\Lambda}_0)$.

Для случая $m > n$, когда число уравнений больше числа идентифицируемых параметров λ_j, $j = 1,2,\ldots,n$, применяется аналогичный подход, как и для случая $m < n$, с той лишь разницей, что матрица $W_2(\breve{\Lambda}_0)$ формируются из строк матрицы $W(\Lambda_0) = f'(\Lambda_0)$.

Для случая, когда производные $\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j}$ в матрице Якоби трудновычислимы в аналитическом виде, используются существующие программные реализации модели (1) $PROG(X, Y, \lambda, G)$ и производные вычисляются приближенно по формуле:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_j} = \frac{1}{2\Delta\lambda_j}(f(X,\lambda_1,\lambda_2,\ldots\lambda_j + \Delta\lambda_j,\ldots\lambda_n,G) - f(X,\lambda_1,\lambda_2,\ldots\lambda_j - \Delta\lambda_j,\ldots\lambda_n,G)). \quad (7)$$

Таким образом, путем применения итерационного процесса для нахождения значений идентифицируемых параметров (4) и использования архивных данных значений измеряемых параметров, осуществляется идентификация математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании, что ведет к повышению их адекватности, а, значит, и достоверности диагностических выводов при решении задач параметрической диагностики.

Литература

1. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. - К.: Наукова думка, 1991. – 201 с.

2. Экспертные системы. Принцип работы и примеры/ Брукннг А., Джонс , Кокс Ф. и др. Под редакцией Форсайта Р.// М.: Радио и связь, 1987.

3. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: Недра, 1987. 198 с.

4. Ефимов А.В.,Зевин С.Л., Адель Аль-Тувайни. Метод построения диагностических моделей оборудования энергоустановок // Вестник НТУ “ХПИ”. Харьков: НТУ “ХПИ”. - 2002. – Вып.13. – С.153-157.

5. Каневец Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников. - К.: Наукова думка, 1979. - 352 с.

6. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин.– М.: Энергоатомиздат, 1986, - 270 с.

7. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1984, 320 с.

8. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1970, - 664 с.

УДК.621.165

В статье рассмотрена задача идентификации математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании ТЭС и АЭС при решении задач параметрической диагностики. Описаны принципиальные стороны решения задачи на основе применения итерационного метода Ньютона для решения нелинейных систем алгебраических уравнений.